توسعه ساختار جدید بهره‌برداری- اقتصادی در شبکه‌های آبیاری فاقد بازار آب

یوسف حسنی[۱]، سیدمهدی هاشمی شاهدانی[۲*] و بنفشه زهرائی[۳]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۲۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۲۹)

چکیده

این تحقیق به معرفی رویکرد بهره‌برداری- اقتصادی به‌عنوان راهبرد جدیدی در بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری پرداخته است. برای رسیدن به این مهم، دو مدل مجزای اقتصادی و بهره‌برداری با هم تلفیق شدند. هدف کلی از تلفیق این مدل‌ها در قالب ساختار توسعه‌یافته واحد، تحویل و توزیع بهینه آب به واحدهای زراعی شبکه آبیاری بر اساس متوسط ارزش اقتصادی محصولات کشاورزی واقع در الگوی کشت موجود آنها است. گفتنی است که به‌منظور فراهم کردن امکان ارزیابی عملکرد سامانه بهره‌برداری کانال آبیاری با بهره‌گیری از رویکرد بهره برداری- اقتصادی، شاخص ارزیابی عملکرد کفایت تحویل و توزیع آب مورد بازنگری قرار گرفت. به‌منظور ارزیابی ساختار توسعه داده شده، کانال اصلی شبکه آبیاری رودشت در حوضه زاینده‌رود به‌عنوان مورد مطالعاتی این تحقیق انتخاب شد و مدیریت بهره‌برداری این کانال قبل و بعد از به‌کارگیری ساختار ارائه شده، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مدل‌سازی اقتصاد کشاورزی شبکه مورد مطالعه نشان داد که در واکنش به سیاست تحویل آب بر اساس ارزش اقتصادی آن در شرایط کم‌آبی، یونجه و گلرنگ در مقایسه با سایر محصولات (به‌خصوص گندم)، از جمله محصولاتی هستند که در الگوی زراعی کشاورزان، سطح زیر کشت را با شدت بیشتری کاهش می‌دهند. دلیل این امر ارزش اقتصادی کمتر آب و سود ناخالص کمتر در واحد هکتار دو محصول گفته شده نسبت به سایر محصولات زراعی، بوده است. علت نوسانات کمتر محصول گندم را نیز می‌توان با وجود هزینه‌های بالا، در قیمت تضمینی و بالای آن در مقایسه با سایر محصولات زراعی توجیه کرد. نتایج ارزیابی عملکرد سامانه بهره‌برداری توسعه داده شده در این تحقیق بر اساس شاخص ارزیابی عملکرد کفایت تحویل آب حاکی از آن بود که در بهره‌برداری معمول کانال (عدم بهره‌گیری از رویکرد اقتصادی) بیشترین مقادیر شاخص کفایت تحویل آب مربوط به چهار آبگیر واقع در بالادست کانال به‌دست آمده است. این درحالی است که با به‌کارگیری رویکرد بهره‌برداری- اقتصادی، آبگیرهای ۱، ۶، ۵ و ۱۲ که مطابق نتایج مدل‌سازی اقتصادی بالاترین اولویت تحویل آب را به‌دست آورده‌اند، مطلوب‌ترین مقادیر شاخص کفایت را دارا هستند.

واژه‌های کلیدی: ارزش اقتصادی آب، شبکه آبیاری، شبیه‌سازی اقتصادی، مدیریت بهره‌برداری

۱. دفتر مدیریت مصرف و ارتقا بهره‌وری آب و آبفا، وزارت نیرو، تهران
۲. گروه مهندسی آبیاری، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، ایران
۳. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: mehdi.hashemy@ut.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

نحوه توزیع منابع آب در مناطق مختلف و میزان فشار حاصل از استحصال منابع آب نشان‌دهنده برداشت منابع آب فراتر از سطح آستانه قابلیت تجدیدپذیری آن در نواحی مختلف است که خود عامل مهمی در برهم زدن شرایط تعادلی عرضه و تقاضای آب در بلندمدت و عدم دستیابی به وضعیت پایداری منابع آب محسوب می‌شود. در کنار این نحوه برخورد با استحصال از منابع آبی، بخش کشاورزی در مناطق نیمه‌خشک، از جمله کشور ایران، بیش از ۸۵ درصد از منابع آب شیرین را برای تأمین غذا در سطح ملی و حفظ درآمد اقتصادی مناطق روستایی مصرف می‌کند، که با کاهش منابع آبی، پایداری این بخش در خطر جدی خواهد بود (۱۹). بنابراین تخصیص بهینه منابع آب و مدیریت همزمان عرضه و تقاضای آن در بخش کشاورزی، به‌عنوان یکی از راهکارهای اساسی خروج از بحران به‌شمار می‌رود.

بر اساس تئوری اقتصادی، تخصیص بهینه برای یک کالای خصوصی در بازار رقابت کامل اتفاق می‌افتد که لازمه آن وجود شرایط خاص در رابطه با بازار و کالای مورد مبادله است. زمانی که قاعده تخصیص در بازار برای کالایی مثل آب مطرح است، تمام فرض‌های مطرح شده در مورد بازار آب به‌دلایل مختلفی از جمله دارا بودن مالکیت مشترک و ماهیت کالای عمومی آب نقض می‌شوند. از همه مهم‌تر خصوصیت چند کارکردی و اثرات خارجی استفاده از آب سبب می‌شود که اصل اقتصادی تخصیص بهینه آن نیز با سایر کالاها متفاوت باشد. در این شرایط است که توسعه بازار آب بسیار متفاوت از سایر کالاها بوده و عوامل زیادی از جمله نقش اسناد بالادستی هر کشور، زمینه‌های لازم به‌منظور تشکیل و یا تقویت ملزومات فنی و نهادی بازار آب، متناسب با شرایط بومی آن کشور بسیار تعیین کننده است. اما اینکه چگونه می‌توان در کشوری مانند ایران که در اسناد بالادستی آن، آب به‌عنوان کالای اقتصادی جایگاه خود را پیدا نکرده است و در بیشتر محدوده‌های مطالعاتی آن زمینه های لازم به‌منظور ایجاد و توسعه بازار آب تاکنون فراهم نشده است، از ایجاد این نهاد مهم در راستای تخصیص بهینه منابع آب کشور سود برد؟ ارائه راه‌حلی برای تخصیص بهینه آب کشاورزی در شرایط عدم وجود بازار آب، هدف کلی این مقاله است که برای نخستین بار در این مطالعه و در قالب ساختار بهره‌برداری- اقتصادی ارائه می‌شود. به‌عبارت دیگر، هدف از ارائه این ساختار ایجاد زیرساخت لازم برای تحویل حجمی آب با رویکرد اقتصادی در یک شبکه آبیاری و در زمان و مکان‌های مختلف است. به‌طوری که این رویکرد علاوه بر درنظر گرفتن اثرات بین بخشی حاصل از کمبود آب (فنی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی)، به ارتقاء روش بهره برداری موجود منطبق بر رویکرد بازار آب می‌پردازد و سازوکاری را فراهم می‌آورد که بر اساس آن، توزیع آب بین آبگیرهای واقع در هر کانال آبیاری بر اساس ارزش اقتصادی آن صورت گیرد.

به‌منظور ایجاد زیرساخت لازم برای مدیریت بهینه آب در شبکه‌های آبیاری، فعالیت‌های متنوعی، فقط با تمرکز بر مدیریت مصرف آب درون مزرعه و بدون درنظر گرفتن اهداف اقتصادی به‌کار گرفته شده‌اند. در این راستا می‌توان به روش‌های مختلف مدیریت آب در مزرعه از جمله توسعه روش‌های مدرن آبیاری تحت فشار در شبکه آبیاری (۱۵)، بهینه‌سازی مصرف آب کشاورزی (۴)، بهینه‌سازی الگوی کشت (۳)، ارتقاء زمانبندی آبیاری با بهره‌گیری از سیستم‌های پشتیبانی تصمیم (۸) توسعه مدل‌های هواشناسی- کشاورزی با هدف تخمین دقیق میزان بارش و نیاز آبی گیاه در جهت صرفه‌جویی آب آبیاری (۲)، و بهبود راندمان کاربرد آب در مزرعه (۱۷)، اشاره کرد. بررسی مطالعات گفته شده حاکی از این واقعیت است که درنظر نگرفتن رویکرد اقتصادی به‌همراه شیوه‌های نوین مدیریت تقاضای آب، هر چند موجب افزایش صرفه‌جویی آب در درون مزرعه شده است، اما آب مازادی که به‌وجود آمده است، موجب توسعه غیر اصولی سطح زیر کشت محصولات آب بر و تغییر الگوی کشت غیر اقتصادی آن شده است. نتیجه این امر، نه تنها بهبود بهره‌وری آب در مقیاس کل یک شبکه

www.SID.ir

Archive of SID

آبیاری را به‌همراه نداشته بلکه اجرای طرح‌های مدرن‌سازی درون مزرعه‌ای را با چالش جدی مواجه می‌کند (۲۰).

در حال حاضر بهره‌گیری از سیاست‌ها و اصول اقتصادی از اهمیت بالایی در مناطق خشک و نیمه‌خشک برخوردار بوده و به‌عنوان یکی از ابزارهای کم‌هزینه می‌تواند مفید واقع شود، به طوری که رویکردهای مبتنی بر اصول اقتصادی، یکی از کاراترین و انعطاف‌پذیرترین روش‌ها برای غلبه بر چالش‌های منابع آب در بخش کشاورزی کشورهای در حال توسعه به‌شمار می‌رود. از جمله از سیاست‌ها و رویکردهای مهم اقتصادی، مدیریت بهره‌برداری منابع آب با استفاده از سیاست تعیین ارزش اقتصادی آب در مناطق کشاورزی و آگاهی یافتن به آثار و نتایج آن در این بخش است (۶). این درحالی است که بهره گیری از سیاست گفته شده در کشوری مثل ایران که استفاده از سیاست‌های سازه‌ای مربوط به افزایش عرضه آب، کارایی موثر خود را از دست داده است، لازم و ضروری است. علاوه بر این ساختار کنونی بخش اقتصاد کشاورزی در بیشتر شبکه‌های آبیاری، که اغلب با محدودیت آب مواجه هستند، دارای شرایط نامناسبی است. به‌نحوی که الگوی کشت شبکه و درنتیجه مصرف آب در آنها با فرض وجود آب فراوان و بسیار ارزان است. کشوری که علاوه بر مشکلات فوق، در اکثر شبکه‌های آبیاری آن، تعرفه آب، میزان بازدهی آب مصرفی و بهره‌وری آن پایین است (۱۰).؛ بنابراین بهره‌گیری از مدل‌های اقتصادی، در قالب مدل‌های هیدرواکونومیک و مدل‌های تصمیم‌گیری در مدیریت کارای آب در شبکه‌های آبیاری لازم و ضروری است. از آنجایی که یکی از اهداف مدیران و متولیان شبکه‌های آبیاری کشور، آگاهی یافتن از نتایج اجرای سیاست‌های مختلف اقتصادی و واکنش کشاورزان به آنها است، لذا به‌کارگیری مدل‌هایی موثر است که بتواند الگویی را که محدودیت‌ها، فرصت‌ها و اهداف شرایط موجود را منعکس کرده و سپس تحت فرض‌های ناشی از اجرای سیاست مورد نظر نتایج حاصل از اجرای آن را به تصویر بکشاند. در این راستا روش برنامه‌ریزی ریاضی، که یک روش تحلیل تجربی است و از تمام اطلاعات موجود (فارغ از اینکه به چه میزان کمیاب هستند) استفاده می‌شود و در تحلیل‌های سیاستی منطقه‌ای و بخشی اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است (۱۸).

استفاده از مدل‌های هیدرواکونومیک در برنامه‌ریزی منابع آب مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان قدمتی تقریباً چهل ساله دارد که به‌عنوان یکی از شاخص‌ترین آنها به مطالعه (۱۲) در زمینه تخصیص بهینه منابع آب می‌توان اشاره کرد. در استرالیا نیز (۱۶) به‌منظور بررسی ارتباط بین تغییرات موجودی آب قابل دسترس و رشد بخش کشاورزی، از مدل هیدرواکونومیک بهره بردند. تعیین استراتژی‌های بهینه آبیاری به‌منظور بیشینه کردن تولید در بخش کشاورزی با استفاده از ساختار هیدرواکونومیک، در محدوده‌های مطالعاتی با شرایط آب‌وهوایی خشک و نیمه‌خشک مورد پژوهش قرار گرفتند (۱۴). در مطالعه دیگری با محاسبه ارزش اقتصادی آب آبیاری و بررسی اثرپذیری آن از تغییرات هیدرولوژیکی، ارتباط بین تغییرات موجودی آب قابل دسترس و رشد بخش کشاورزی و اثر آن بر ارزش آب آبیاری در استرالیا مورد بررسی قرار گرفت (۱). در تحقیق مشابهی با کاربرد روش برنامه‌ریزی ریاضی مثبت، به مقایسه اثرات مکانیزم های حمایتی مربوط به سیاست مشترک کشاورزی اتحادیه اروپا بر تولید مزارع نمونه در منطقه‌ای از اسپانیا پرداخته شد. نتایج نشان داد که در مقایسه با سیاست‌های قبلی، سود ناخالص به‌صورت چشمگیری کاهش می‌یابد (۱۳).در همین راستا با استفاده از روش برنامه‌ریزی ریاضی مثبت به بررسی و تجزیه‌و تحلیل ابزارهای سیاسی برای کنترل کردن آلودگی نیترات در آبیاری کشاورزی در چند شبکه آبیاری در کشور اسپانیا پرداخته شد و نتایج نشان داد که اصلاحات اخیر در سیاست‌های معمول کشاورزی منجر به کاهش اساسی در آلودگی نیترات خواهد شد و اگر این کاهش به اندازه کافی درنظر گرفته نشود سایر ابزارهای سیاسی می‌تواند این منابع آلودگی را بیشتر کاهش دهد (۵). از دیگر مطالعات انجام شده در این زمینه می‌توان به مطالعه‌ای اشاره کرد که با استفاده از مدل هیدرواکونومیک اثرات خشکسالی در تخصیص بهینه منابع

www.SID.ir

Archive of SID

آب در بخش‌های اقتصادی از جمله بخش کشاورزی را بررسی کرده و سیاست‌های مختلف تخصیص آب و گزینه‌های مدیریتی تحت سناریوهای مختلف اقلیمی در بخش‌های گفته شده را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند (۲۱).

با درنظر گرفتن موارد فوق، نوآوری این تحقیق عبارت است از ارائه یک ساختار بهره‌برداری با رویکرد اقتصادی در محدوده شبکه‌های آبیاری. هدف کلی از تهیه و تدوین ساختار بهره‌برداری- اقتصادی تحقیق حاضر این است که تحویل و توزیع آب به آبگیرهای واقع شده در طول کانال‌های آبیاری بر اساس رویکرد اقتصادی (با درنظر گرفتن متوسط وزنی ارزش اقتصادی محصولات کشاورزی واقع در الگوی کشت موجود نواحی زراعی پایاب هر آبگیر) صورت گیرد و اثرات ناشی از نحوه تحویل و توزیع آب بر الگوی کشت موجود هر کدام از نواحی زراعی (پایاب آبگیرها)، درآمد کشاورزان و غیره مشخص می‌شود. اجزا و چگونگی کارکرد و تئوری ساختار توسعه داده شده این تحقیق در ادامه مقاله تشریح شده است. به‌منظور ارائه نتایج به‌کارگیری از ساختار ارائه شده، کانال اصلی شبکه آبیاری رودشت به‌عنوان مورد مطالعاتی این تحقیق انتخاب شده است و مدیریت بهره‌برداری این کانال قبل و بعد از به‌کارگیری ساختار ارائه شده، مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

مدل مفهومی ساختار بهره‌برداری– اقتصادی

ساختار مدل مفهومی تحقیق حاضر مطابق شکل ۱ است. همان گونه که در این شکل ملاحظه می‌شود، مدل توسعه‌یافته مذکور از دو جزء اصلی شامل: مدل اقتصادی و مدل بهره‌برداری تشکیل شده است که ارتباط متقابلی با هم دارند. هدف اصلی از کاربرد جزء اول این رویکرد (مدل اقتصادی) شبیه‌سازی شرایط موجود فعالیت‌های کشاورزی در قالب الگوی کشت موجود واحدهای زراعی است. این شبیه‌سازی به‌منظور محاسبه درآمد بخش کشاورزی، ارزش اقتصادی آب (محصولات کشاورزی واقع در الگوی کشت موجود کشاورزی واحدهای مذکور) و فایده اقتصادی آن صورت می‌گیرد.

جزء دوم رویکرد مذکور، مدل بهره‌برداری است که با تحویل و توزیع آب به واحدهای زراعی بر اساس متوسط وزنی ارزش اقتصادی آب (به‌دست آمده از مدل اقتصادی)، موجب تغییر رقوم سطح آب در بالادست آبگیر کانال‌های درجه دو و درنهایت حجم آب ورودی به آنها نسبت به حالت موجود می‌شود.

مدل اقتصادی برنامه‌ریزی ریاضی مثبت

فرض بر این است که همه کشاورزانی که در محدوده مطالعاتی مورد نظر (شبکه آبیاری) مشغول به فعالیت کشاورزی هستند به دنبال بیشینه کردن درآمد خالص یا سود خود در هر سال زراعی معین هستند، بنابراین پایه و اساس مدل تحلیلی در این تحقیق، تابع هدف مدل اقتصادی رویکرد بهره‌برداری- اقتصادی به صورت زیر تعریف شده است:

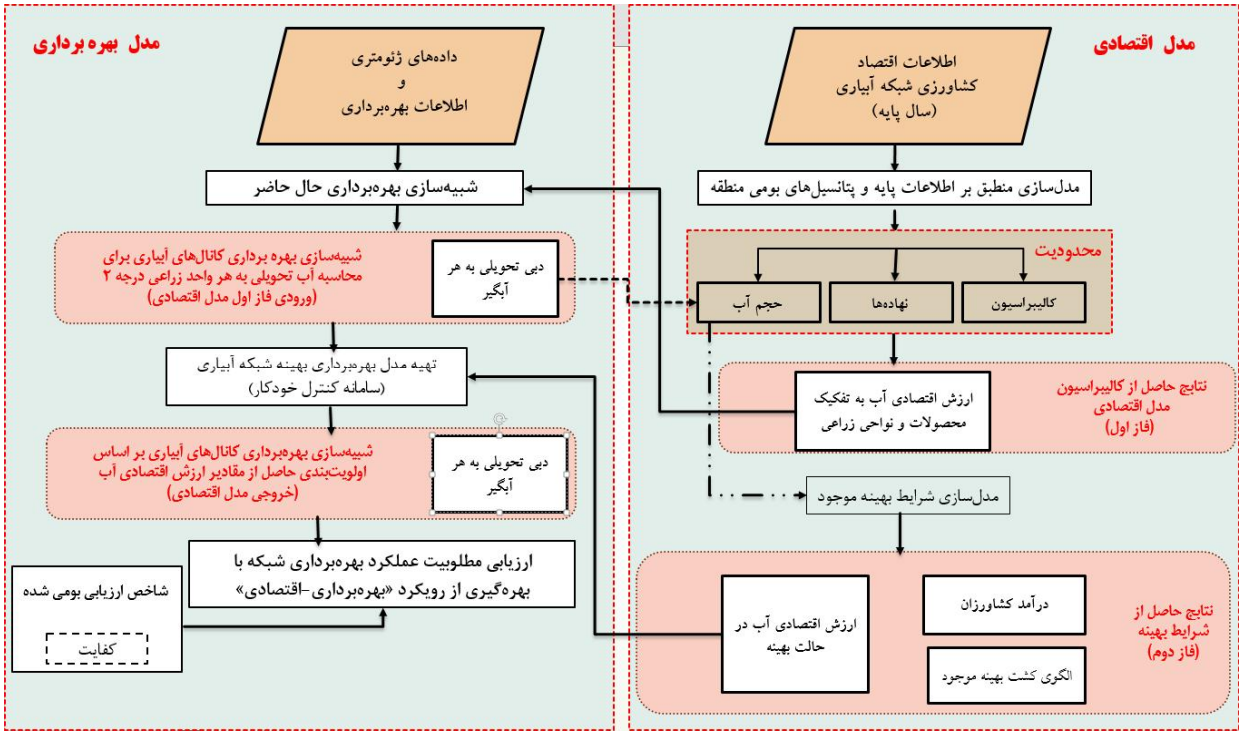
$$\max \text{net} = \sum_{i}\left[p_i \, q_i(X_{ih}, P_i) - \sum_{h} p_h X_{ih} - (\alpha_i X_{iland} + 0.5\psi_i X_{iland}^2) \right] \quad (1)$$

قسمت اول (سمت راست) معادله یک، نشان‌دهنده درآمد ناخالص است که pi قیمت محصول i ام (ریال) است که توسط تابع تولید $q_i(X_{ih},P_i)$ تولید می‌شوند. X_{ih}، ماتریس (i×h) متشکل از محصولات زراعی i و نهاده‌های کشاورزی h، شامل زمین (هکتار)، حجم آب سطحی مورد استفاده در آبیاری (مترمکعب)، نیروی کار اجاره‌ای (نفر)، نیروی کار خانوادگی (نفر) و نهاده‌های قابل خرید مانند کود (کیلوگرم)، سم (کیلوگرم) و غیره هستند. P_i هم نشان‌دهنده حجم بارشی است که در طول فصل رشد محصول i، بر زمین زراعی فرود آید (میلی‌متر).

هزینه هر واحد از تولید محصول i با دو بخش جداگانه در معادله یک تعریف شده است. بخش اول نشان‌دهنده حاصلضرب قیمت بازاری (ph) نهاده‌ها در مقدار مصرف آنها (X_{ih}) است و بخش دوم که در داخل پرانتز قرار دارد، به‌منظور درنظر گرفتن هزینه ضمنی زمین بر اساس تخصیص آن است که دارای تصریح

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱- ساختار بهره‌برداری- اقتصادی توسعه یافته در تحقیق حاضر

درجه دو با پارامترهای و (بی‌بعد) بوده و افزایشی بودن هزینه نهایی زمین را برای محصولات مختلف درنظر می‌گیرد. تابع تولید $q_i(X_{ih},P_i)$، تخمینی از محصولات تولید شده را به‌وسیله مجموعه‌ای از نهاده‌های موجود و سطح بارش برای هر محصول زراعی i فراهم می‌کند. فرم تابعی مورد استفاده برای q از نوع کشش جانشینی ثابت است و شکل تابع مذکور برای محصولات کشاورزی آبی به شرح ذیل است (۱۹):

$$q_i^{ir} = A_i\left(\sum_h b_{ih-1}X_{i\,h-1}^{\gamma} + b_w\left(X_{isw}+P_i^a\right)^{\gamma}\right)^{\frac{\varepsilon_i}{\gamma}} \qquad (۲)$$

توان ir در q_i^{ir} مخفف تابع تولید آبی، Ai نشان‌دهنده سهم پارامترهای منطقه‌ای و b_{ih} پارامترهای تابع تولید برای همه نهاده های تولید به‌جز آب سطحی، b_w سهم آب سطحی (X_{isw}) یا بارش P_i^a از آب آبیاری کل و γ و ε_i نیز پارامتر بازده به مقیاس است.

در مورد نهاده‌هایی با عرضه محدود مانند نیروی کار خانوادگی، آب سطحی و زمین، هزینه نهایی هر واحد نهاده از مجموع قیمت بازاری به‌علاوه قیمت سایه‌ای آنها به‌دست می‌آید. قیمت‌های سایه‌ای برای هر نهاده غیر بازاری و یا با عرضه محدود توسط ضریب لاگرانژ، از حل یک مدل برنامه‌ریزی خطی معمولی به‌شرح ذیل با تابع بیشینه‌سازی سود کشاورزان منطقه و محدودیت‌های واسنجی به‌همراه محدودیت‌های منابع با هدف برآورد قیمت‌های سایه‌ای سطح زیر کشت محصولات، گفتنی است که این الگو با استفاده از محدودیت‌های واسنجی مقادیر سال پایه را باز تولید می‌کند (۲۰):

$$\max_{land}\sum_i p_i\hat{y}_i X_{iland} - \sum_i p_h a_{ih} X_{iland} \qquad (۳)$$

$$\begin{cases} \text{Land}: \sum_i X_{iland} \le B_{land}, \\ \text{Family labor}: \sum_i a_{ifl} X_{iland} \le B_{fl}, \end{cases} \qquad (۴)$$

$$\left\{\text{Surface Water}: \sum_i X_{iswm} \le B_{swm}, \right. \qquad (۵)$$

$$X_{iland} \le \hat{X}_{land} \qquad (۶)$$

که در رابطه (۳)، Pi قیمت محصول i ام (ریال)، $\hat{y}$ عملکرد در هکتار زمین تخصیص داده شده به محصول X_{iswm} (کیلوگرم)،

www.SID.ir

Archive of SID

P_h هزینه هر واحد از نهاده h مورد استفاده در تولید محصول i (ریال) و a_{ih} نهاده‌های مورد استفاده در واحد هکتار هستند. B_{land} و B_{fl} به‌ترتیب بازتاب کل زمین در دسترس (هکتار) و نیروی کار خانوادگی (نفر) در رابطه (۴) هستند و رابطه (۵) تضمین می‌کند که مقدار کل آب‌های سطحی مورد استفاده (X_{iswm}) (مترمکعب) در ماه یا سال m، کمتر یا مساوی میزان کل آب سطحی در دسترس (B_{swm}) برای آبیاری محصولات زراعی در همان ماه و یا سال است. در رابطه (۶)، X_{iland} عبارت است از مساحت کل زمین تخصیص داده شده به محصول زراعی i که توسط محقق مشاهده شده است (هکتار).

به‌منظور شبیه‌سازی شرایط موجود کشاورزی و دستیابی به مجموعه بهینه از نهاده‌های بیشینه کننده درآمد خالص، تابع تولید غیرخطی کشش جانشینی ثابت که با استفاده از قیمت‌های سایه‌ای منابع محدود، نامحدود و محدودیت واسنجی به‌دست آمده است، در تابع هدف خطی اولیه (۱) به‌جای $q_i(X_{ih},P_i)$ قرار می‌گیرد و تابع هدف غیرخطی گفته شده (رابطه ۷) در یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی شبیه به مسئله ذیل به استثناء محدودیت‌های واسنجی ولی همراه با سایر محدودیت‌های مدل، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$\max_{X} \text{net} \sum_i [p_i \hat{q}_i^r(X_{ih},P_i) + p_i \hat{q}_i^{ir}(X_{ih},P_i) - \sum_i p_h X_{ih} - (\hat{\alpha}_i X_{iland} + \hat{\psi}_i X_{iland}^2)] \quad (۷)$$

$$\text{Land}: \sum_i X_{iland} \le B_{land}, \quad (۸)$$

$$\text{Family labor}: \sum_i X_{iland} \le B_{fl}, \quad (۹)$$

$$\text{Surface Water}: \sum_i X_{iswm} \le B_{swm}, \quad (۱۰)$$

مدل بهره‌برداری سامانه کنترل خودکار کانال آبیاری

در ساختار بهره‌برداری- اقتصادی توسعه داده شده از روش کنترل خودکار بهینه پیش‌بین استفاده شده است. در طراحی کنترل‌گر مذکور علاوه بر به‌کارگیری دو روش کنترل کلاسیک پس‌خور[۵] و پیش‌خور[۶]، یک روش بهینه‌سازی برای محاسبه متغیر خروجی کنترل‌گر (منظور رقوم سطح آب در مجاورت سازه‌های کنترل و تنظیم سطح آب) استفاده می شود. کنترل‌گر پس‌خور زمانی واکنش نشان می‌دهد که اختلال وارد شده به سیستم توسط حسگرها تشخیص داده شود. الگوریتمی که در ساختار آن کنترل پس‌خور به‌تنهایی به‌کار رفته باشد، پس از انحراف سیستم از وضعیت هدف، واکنش نشان می‌دهد. درنتیجه این نوع کنترل‌گر همواره با یک تأخیر زمانی همراه است. وقتی که خروجی کنترل از ظرفیت نهایی سازه کنترل بیشتر باشد کنترل‌گر کارایی خود را از دست داده و سیستم از وضعیت هدف دورتر می‌شود. اگر کنترل‌گر پس‌خور با پیش‌خور تلفیق شود سیستم کنترل قابلیت محاسبه و پیش‌بینی میزان اغتشاشات آینده سیستم را داشته و درنتیجه اثر آنها بر تراز سطح آب در کنترل‌گر درنظر گرفته می‌شود. کنترل تراز سطح آب تا زمانی که اغتشاش وارد شده از ظرفیت عبوری سازه تنظیم بیشتر نشده باشد، به خوبی انجام می‌گیرد. استفاده از فرایند بهینه‌سازی در کنترل گر پیش‌بین سبب خواهد شد تا محدودیت‌های موجود در عملکرد کانال‌های آبیاری تحت کنترل (شامل محدودیت بازشدگی سازه‌ها) در فرایند بهره‌برداری لحاظ شده و مجموعه‌ای از اهداف مختلف در کنترل هیدرولیک جریان درنظر گرفته شود (۲۱).

کنترل خودکار مدیریت بهره‌برداری یک سامانه آبی، اعم از شبکه آبیاری، با بهره‌گیری از روش پیش‌بین با استفاده از مدل فضای حالت (State space model) صورت می‌گیرد که امکان فشرده‌سازی فرمولاسیون چندمتغیره مدل‌های خطی را مهیا می‌کنند. دلیل استفاده از این چنین مدل‌هایی آن است که کانال‌های آبیاری شامل زیر سیستم‌هایی هستند (بازه‌های کانال) که برهم اثر متقابل دارند. در کانال‌های اصلی آبیاری اغلب برهم‌کنش اصلی مربوط به جریان‌های عبوری از سازه ها است که به‌وسیله کنترل‌گر تنظیم می‌شود. هر زیر سیستم حداقل یک نقطه اندازه‌گیری آب و یک سازه تنظیم جریان دارد. با درنظر گرفتن تمامی زیر سیستم‌ها به‌عنوان یک سیستم واحد، کنترل‌گر نیاز به یک پیکربندی چندمتغیره

www.SID.ir

Archive of SID

دارد. همان‌طور که گفته شد، مدل‌های فضای حالت امکان فشرده‌سازی فرمولاسیون چندمتغیره مدل‌های خطی را مهیا می‌کنند. بسیاری از الگوریتم‌ها و ابزار حل مسائل کنترل، مبتنی بر روش استانداردسازی مدل فضای حالت هستند. در کنترل سیستم آبی به‌روش پیش‌بین نیز از مدل‌های فضای حالت برای بیان مدل داخلی استفاده می‌شود. مدل فضای حالت استفاده شده در سیستم کانال آبیاری را می‌توان در حالت کلی به فرم معادله (۱۱) بیان کرد (۲۲):

$$X(k+1) = A(k).x(k)+B_u.u(k)+B_d.d(k) \qquad (۱۱)$$

در این معادله: **x** وضعیت جریان در کانال (اغلب سطح آب در نقاط هدف) را نشان می دهد. **u** اقدام کنترلی محاسبه شده بوسیله کنترل‌گر (میزان تغییر وضعیت سازه تنظیم)، **d** اغتشاشات پیش‌بینی شده و k نیز شاخص گام زمانی است. پارامترهای **A**، $\mathbf{B_u}$ و $\mathbf{B_d}$ ضرائب معادلات هستند که به‌ترتیب عبارتند از: ماتریس سیستم، ماتریس ضرائب کنترل و ماتریس ضرائب اغتشاشات. چگونگی فرمول‌بندی این رابطه بستگی به نوع مدل داخلی انتخاب شده برای سیستم دارد. شورمانز (به نقل از ۶) مدل داخلی انتگرالی- تأخیری (Integrator Delay Model) را به‌عنوان مدل داخلی برای طراحی الگوریتم‌های کنترل معرفی کرد. مطابق این مدل هر بازه از کانال آبیاری را به دو بخش، تقسیم کرد و مدلی تقریبی آن را به‌شرح ذیل ارائه کرد. اطلاعات تکمیلی در مورد نحوه فرمولاسیون و جزئیات مدل مذکور در (۲۱ و ۲۲) آمده است.

تابع هدف کنترل‌گر پیش‌بین بر اساس هدف اصلی بهره برداری کانال آبیاری تعریف می‌شود که عبارت است از کنترل وضعیت هیدرولیکی سیستم آبی در وضعیت مطلوب از قبل تعیین شده. با استفاده از برنامه‌ریزی درجه دوم، تابع هدف مطابق رابطه زیر تشکیل می‌شود (۲۲):

$$\min J = \mathbf{X}^T.\mathbf{Q}.\mathbf{X}+\mathbf{U}^T.\mathbf{R}.\mathbf{U} \qquad (۱۲)$$

که در این رابطه که J تابع هدف را نشان می‌دهد که باید حداقل شود، X متغیرهای حالت، U اعمال کنترلی، Q ماتریس وزن برای متغیرهای حالت و R ماتریس وزن برای اعمال کنترلی هستند.

شاخص‌های مورد بررسی در ساختار بهره‌برداری- اقتصادی

به‌دلیل بررسی دقیق‌تر تأثیر به‌کارگیری مدل اقتصادی در بهره برداری کانال آبیاری در ساختار توسعه داده شده بهره‌برداری- اقتصادی این تحقیق، شاخص کفایت تحویل و توزیع آب (۲۳) به‌عنوان یکی از پرکاربردترین شاخص‌های ارزیابی عملکرد بهره برداری مورد استفاده قرار می‌گیرند. نکته حائز اهمیت آن است که شاخص گفته شده بر مبنای مفهوم فیزیکی آب استوار است و استفاده از آن در ساختار توسعه داده شده بهره‌برداری- اقتصادی مناسب نیست. بنابراین شاخص مذکور برای استفاده در ساختار بهره‌برداری- اقتصادی مورد بازنگری قرار گرفت که در رابطه (۱۷) ارائه شده است:

$$MPA_{modified} = \frac{1}{T}\sum_{T}\left[\frac{1}{R}\sum_{R}\left(PA_{modified}\right)\right],$$

$$\begin{cases} Q_D < Q_{R_{modified}} \\ PA = \dfrac{Q_D}{Q_{R_{modified}}} \end{cases}, \begin{cases} Q_{R_{modified}} < Q_D \\ PA = 1 \end{cases} \qquad (۱۳)$$

$$Q_{R\,modified_i} = Q_R - \frac{\max(EVW_i) - EVW_i}{\sum_{i=1}^{n}\max(EVW_i) - EVW_i} \times WD$$

در روابط فوق شاخص $MPA_{modified}$ شاخص بازنگری شده متوسط کفایت تحویل، i اندیس هر آبگیر واقع در کانال اصلی، n تعداد آبگیرها، EVW ارزش اقتصادی آب محاسبه شده توسط مدل اقتصادی برای واحد زراعی پایاب آبگیر، WD میزان کمبود آب ورودی در سناریوی بهره‌برداری هستند. T مجموع گام‌های زمانی شبیه‌سازی و Q_D میزان دبی تحویلی به یک آبگیر در هر گام زمانی شبیه‌سازی است. Q_R میزان دبی تقاضا شده برای آبگیر قبل از به‌کارگیری رویکرد بهره‌برداری- اقتصادی است که در برنامه زمانی تحویل آب مشخص شده است. دلیل توسعه شاخص مذکور در این تحقیق، عدم کارایی آن در بررسی ساختار توسعه داده شده این تحقیق بوده است. ماهیت این شاخص فقط مبتنی بر مفاهیم فیزیکی بوده و جنبه های دیگر بهره‌برداری (مانند جنبه اقتصادی این تحقیق) در آن تأثیری ندارد. شاخص اصلاح شده مبتنی بر رویکرد

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و هیدرولیکی آبگیرهای واقع شده در کانال اصلی

شماره آبگیر	دریچه آبگیر	نوع آبگیر	دبی مورد نقاضا (لیتر بر ثانیه)	شماره آبگیر	دریچه آبگیر	نوع آبگیر	دبی مورد نقاضا (لیتر بر ثانیه)
۱	P0R	L2	۵۵	۱۴	CL7	XX2	۳۳
۲	P0L	L2	۲۱	۱۵	PL7	XX2	۱۲
۳	CL1	XX2	۱۵	۱۶	CL8	L2	۱۲
۴	CL2	XX2	۷۹	۱۷	PL8	XX2	۱۲
۵	PL2	XX2	۷۳	۱۸	CL9	L2	۵۸
۶	CL3	XX2	۲۱	۱۹	PL9	XX2	۵۸
۷	PL3	XX2	۴۹	۲۰	CL10	L2	۵۸
۸	CL4	XX2	۵۵	۲۱	CL11	L2	۱۷۵
۹	PL4	XX2	۱۰۰	۲۲	PL11	XX2	۶۰
۱۰	CL5	XX2	۲۱	۲۳	CL12	XX2	۶۰
۱۱	PL5	XX2	۲۱	۲۴	CL13	L2	۱۷۵
۱۲	CL6	L2	۲۴	۲۵	PL13	XX2	۶۱
۱۳	PL6	XX2	۳۳	۲۶	CL14	XX2	۱۱۲

بهره‌برداری- اقتصادی، با اصلاح میزان تقاضای آب (کسر مخرج) بر اساس اولویت اقتصادی تحویل آب به آبگیرها، مفهوم اقتصادی را به این شاخص‌ها اضافه کرده است.

کانال اصلی شبکه‌آبیاری رودشت شمالی

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، به‌منظور نشان دادن میزان تأثیرگذاری ساختار توسعه داده شده بهره‌برداری- اقتصادی این تحقیق، کانال اصلی شبکه آبیاری رودشت به‌عنوان نمونه مطالعاتی انتخاب شد. رودشت آخرین شبکه آبیاری است که از زاینده‌رود آبگیری می‌کند. بنابراین همه نوسانات رودخانه در طول مسیر رودخانه روی شبکه آبیاری رودشت تأثیر می‌گذارند. این تأثیر به‌صورت نوسانات مداوم دبی ورودی به شبکه و درنتیجه اختلال در کارکرد شبکه بروز می‌کند. بر اساس اطلاعات به‌دست آمده از دفتر بهره‌برداری شبکه رودشت، در سال‌های اخیر به‌دلیل خشکسالی‌های پدید آمده، به‌دلیل عرضه کم آب و نیاز شدید به مصرف، تصمیم برآن بوده است که کل آبدهی رودخانه (در پائین‌دست رودخانه) به شبکه رودشت وارد و توزیع شود. در این تحقیق کانال اصلی شاخه شمالی شبکه آبیاری رودشت به‌عنوان مورد مطالعاتی انتخاب شده است. این بخش از کانال دارای شیب ملایم و شامل ۱۴ سازه آب‌بند (سازه تنظیم کننده سطح آب) است که بر این اساس کانال مورد مطالعه به ۱۳ بازه تقسیم می‌شود. در این کانال تنظیم تراز سطح آب در کانال به‌طور معمول برای هر زوج آبگیر (دریچه‌های نیرپیک) توسط یک سازه تنظیم (سرریز نوک اردکی) انجام می‌شود. شرایط فیزیکی و هیدرولیکی آبگیرهای واقع شده در طول کانال اصلی چپ شاخه شمالی در جدول ۱ ارائه شده است. در این جدول آبگیرهای موجود در طول کانال، دبی حقابه و مقادیر متوسط دبی تحویلی به هر کدام از آبگیرها نشان داده شده است.

اطلاعات مورد نیاز برای مدل‌سازی اقتصاد کشاورزی شبکه آبیاری رودشت در جریان انجام این تحقیق و بر پایه داده‌برداری میدانی، مصاحبه با کارشناسان آب منطقه‌ای، جهاد کشاورزی، مدیران شبکه آبیاری و کشاورزان منطقه و نیز گزارش‌های موجود در آب منطقه‌ای استخراج شدند.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲. اطلاعات مرتبط با برآورد حجم آب مصرفی محصولات زراعی واقع در الگوی کشت موجود شبکه آبیاری رودشت

ردیف	نام محصول	بارش مؤثر (میلی‌متر)	تبخیر و تعرق (میلی‌متر)	نیاز خالص آبی در هکتار (متر مکعب)	راندمان کاربرد	نیاز ناخالص (متر مکعب)	معیار تنش آبی	آب مصرفی (متر مکعب)
۱	گندم	۵	۴۸۵	۴۸۰۰	۰/۳۲	۱۴۹۰۷	۰/۷۵	۱۱۱۸۰
۲	جو	۵	۴۱۱	۴۰۶۰	۰/۳۲	۱۲۶۰۹	۰/۷۱	۸۹۵۲
۳	یونجه	۵۳	۸۷۶	۸۲۳۰	۰/۳۲	۲۵۵۵۹	۰/۷۵	۱۹۱۶۹
۴	گلرنگ	۰	۶۹۴	۶۹۴۰	۰/۳۲	۲۱۵۵۳	۰/۷۷	۱۶۵۹۶
۵	چغندرقند	۰	۹۴۲	۹۴۲۰	۰/۳۲	۲۹۲۵۵	۰/۶۷	۱۹۶۰۱

جدول ۳. اطلاعات مورد استفاده در مدل‌سازی اقتصاد کشاورزی شبکه آبیاری رودشت

	نام محصول				
	گندم	جو	یونجه	گلرنگ	چغندرقند
قیمت محصول (کیلو/ تومان)	۱۱۵۵	۹۲۰	۵۰۰	۲۱۵۰	۲۷۰
عملکرد (تن)	۴/۴۱	۴/۲۱	۱۱/۶۴	۱/۹۴	۴۴/۲۳
درآمد محصول (تومان)	۵۰۹۳۵۵۰	۳۸۷۳۲۰۰	۵۸۲۰۰۰۰	۴۱۷۱۰۰۰	۱۱۹۴۲۱۰۰
کل هزینه محصول (تومان)	۲۸۳۳۰۱۲	۲۱۶۰۴۷۷	۴۰۵۵۲۴۷	۲۴۲۰۲۹۷	۷۰۵۰۵۲۳
سود ناخالص (تومان)	۲۲۶۰۵۳۸	۱۷۱۲۷۲۳	۱۷۶۴۷۵۳	۱۷۵۰۷۰۳	۴۸۹۱۵۷۷

خلاصه‌ای از اطلاعات مورد استفاده در مدل‌سازی اقتصادی شبکه آبیاری رودشت در قالب جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.

نتایج و بحث

شبیه‌سازی شرایط موجود اقتصاد کشاورزی شبکه آبیاری رودشت

با استفاده از جزء اقتصادی ساختار مدل مفهومی شکل ۱ و با بهره‌گیری از آمار و اطلاعات جمع‌آوری شده مطابق جدول‌های ۲ و ۳، شرایط موجود اقتصاد کشاورزی به‌تفکیک هر کدام از واحدهای زراعی شبیه‌سازی شد. به‌دلیل حجم زیاد نتایج به‌دست آمده، به‌عنوان نمونه شرایط اقتصاد کشاورزی و نتایج حاصل از واسنجی مدل اقتصادی و ارزش اقتصادی آب محصولات زراعی واقع در الگوی کشت واحد زراعی شماره چهار به‌شرح جدول ۴ ارائه می‌شود.

با شبیه‌سازی شرایط موجود اقتصاد کشاورزی واحدهای زراعی، زمینه لازم برای آزمون سناریوها و سیاست‌های مختلف مدنظر مدیران و متولیان بهره‌برداری از شبکه (به‌عنوان مثال سناریوی خشکسالی) فراهم می‌شود. همچنین، ارزش اقتصادی آب درون‌زای محصولات زراعی واقع در الگوی کشت موجود به‌همراه میانگین وزنی آنها (به‌تفکیک واحدهای زراعی ۲۶گانه) مورد محاسبه قرار گرفت (مطابق جدول ۵) و از این طریق، امکان تحویل بهینه آب توسط مدل بهره‌برداری (بر اساس ارزش‌های اقتصادی آب) به واحدهای زراعی ۲۶گانه فراهم شد.

همانگونه که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، ترتیب اولویت تحویل آب به واحدهای زراعی در شرایط پایه (تحویل آب در شرایط پایه به‌ترتیب شماره هر واحد زراعی صورت می‌گیرد) متفاوت از تحویل بر اساس ارزش اقتصادی آب به‌دست آمده است به‌طوری که ترتیب این اولویت‌ها تناسب

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۴. نتایج حاصل از واسنجی مدل اقتصادی و ارزش اقتصادی آب در واحد زراعی شماره چهار

ردیف	نام محصول	سطح زیر کشت در سال پایه (هکتار)	سطح زیر کشت در مدل PMP (هکتار)	ارزش اقتصادی آب (ریال بر متر مکعب)	متوسط وزنی ارزش اقتصادی آب (ریال بر متر مکعب)
۱	گندم	۹۲۱	۹۲۱/۰۰۳	۱۵۸۷	
۲	جو	۱۷۶	۱۷۶/۰۰۰۱	۱۵۶۶	
۳	یونجه	۹۷	۹۷/۰۰۰۲	۱۲۰۰	۱۵۳۹
۴	گلرنگ	۷۱	۷۱/۰۰۰۸	۱۲۷۵	
۵	چغندرقند	۲۲	۲۲	۱۶۷۱	

جدول ۵. اولویت تحویل آب و میانگین وزنی ارزش اقتصادی آب واحدهای زراعی ۲۶ گانه (واحد: ریال بر متر مکعب)

	اولویت تحویل آب به واحدهای زراعی												
اولویت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳
شماره آبگیر	۱	۶	۵	۱۲	۱۰	۱۶	۳	۴	۷	۸	۲۰	۲۲	۱۳
میانگین وزنی ارزش اقتصادی آب (ریال)	۱۵۸۵	۱۵۸۴	۱۵۸۱	۱۵۷۰	۱۵۵۴	۱۵۵۳	۱۵۴۲	۱۵۳۹	۱۵۳۹	۱۵۳۵	۱۵۲۶	۱۵۱۹	۱۵۱۶
	اولویت تحویل آب به واحدهای زراعی												
اولویت	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶
شماره آبگیر	۱۱	۲۴	۹	۱۴	۱۵	۲۵	۱۷	۲۱	۱۸	۲۶	۲	۲۳	۱۹
میانگین وزنی ارزش اقتصادی آب (ریال)	۱۵۱۳	۱۵۱۳	۱۵۰۸	۱۴۹۷	۱۴۹۴	۱۴۹۲	۱۴۸۷	۱۴۸۲	۱۴۸۰	۱۴۸۰	۱۴۷۹	۱۴۷۶	۱۴۷۲

خاصی با محل قرارگیری آبگیر واحد زراعی (بالادست، میان دست و یا پایین‌دست کانال اصلی) ندارد. با مشخص شدن اولویت‌های گفته شده، مطابق اطلاعات مندرج در جدول ۵ زمینه لازم به‌منظور ارتباط بین مدل‌های بهره‌برداری و اقتصادی در قالب ساختار توسعه‌یافته بهره‌برداری– اقتصادی فراهم شده است.

همان‌گونه که پیشتر نیز بیان شد، جزء دوم ساختار ارائه شده در این تحقیق، مدل بهره‌برداری است که با تحویل و توزیع آب به واحدهای زراعی بر اساس متوسط وزنی ارزش اقتصادی آب (به‌دست آمده از مدل اقتصادی)، موجب تغییر رقوم سطح آب در بالادست آبگیر کانال‌های درجه دو و در نهایت حجم آب ورودی به آنها نسبت به حالت موجود می‌شود. حجم آب ورودی به هر یک از واحدهای زراعی به‌عنوان یکی از محدودیت‌های اساسی مدل اقتصادی است. بنابراین تغییر حجم آب بر اساس اولویت ارزش اقتصادی آن توسط مدل بهره برداری در شرایط پایه به‌عنوان یک سناریو برای مدل اقتصادی به‌شمار می‌آید. پل ارتباطی بین دو مدل بهره‌برداری و مدل اقتصادی دبی تحویلی به آبگیر است که این حجم آب بر اساس اولویت ارزش اقتصادی آن که از مدل اقتصادی به‌دست آمده (جدول ۵)، توسط مدل بهره‌برداری به واحدهای زراعی تحویل داده می‌شود.

جدول ۶، حجم آب تحویلی به واحدهای زراعی ۲۶گانه شبکه آبیاری رودشت را در شرایط وجود نوسانات ورودی به زمان کم‌آبی و با درنظر گرفتن میانگین وزنی ارزش اقتصادی آب (اولویت تحویل و توزیع آب در مدل بهره‌برداری) را نشان می‌دهد. در واقع سامانه بهره‌برداری کنترل خودکار پیش‌بین

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۶. خروجی مدل بهره‌برداری با درنظر گرفتن اولویت‌های تحویل آب به‌دست آمده از مدل اقتصادی در شرایط نوسانات ورودی

اولویت تحویل آب به آبگیرهای واحد درجه دو	شماره آبگیر	میانگین وزنی ارزش اقتصادی آب (ریال)	مقدار نیاز خالص الگوی کشت واحد زراعی درجه دو (متر مکعب)	مقدار نیاز ناخالص الگوی کشت واحد زراعی درجه دو (متر مکعب)	کاهش جریان ورودی در محل سراب کانال (نوسانات ورودی+کم آبی) (درصد)	میزان آب تحویلی سامانه کنترل خودکار به آبگیر (متر مکعب)
۱	۱	۱۵۸۵	۱،۲۵۱،۵۰۲	۱،۸۴۰،۴۴۴		۱،۲۵۱،۵۰۲
۲	۶	۱۵۸۴	۲،۸۵۰،۷۶۴	۴،۱۹۲،۳۰۰		۲،۸۵۰،۷۶۴
۳	۵	۱۵۸۱	۲،۰۶۰،۴۹۵	۳،۰۳۰،۱۴۰		۲،۰۶۰،۴۹۵
۴	۱۲	۱۵۷۰	۵،۶۸۲،۲۹۹	۸،۳۵۶،۳۲۲		۵،۶۸۲،۲۹۹
۵	۱۰	۱۵۵۴	۳،۷۳۹،۳۰۱	۵،۴۹۸،۹۷۲		۳،۷۳۹،۳۰۱
۶	۱۶	۱۵۵۳	۵،۲۲۰،۷۰۱	۷،۶۷۷،۵۰۲		۵،۲۲۰،۷۰۱
۷	۳	۱۵۴۲	۵،۱۲۹،۴۷۵	۷،۵۴۳،۳۴۵		۵،۰۷۸،۱۸۰
۸	۴	۱۵۳۹	۱۰،۴۳۲،۰۵۹	۱۵،۳۴۱،۲۶۳		۱۰،۱۸۱،۶۸۹
۹	۷	۱۵۳۹	۳،۳۴۸،۵۱۸	۴،۹۲۴،۲۹۱		۳،۲۳۱،۳۲۰
۱۰	۸	۱۵۳۵	۳،۵۸۱،۳۹۵	۵،۲۶۶،۷۵۷		۳،۴۰۴،۴۷۴
۱۱	۲۰	۱۵۲۶	۲،۵۰۳،۰۰۴	۳،۶۸۰،۸۸۸		۲،۳۶۰،۳۳۳
۱۲	۲۲	۱۵۱۹	۲،۴۲۸،۴۹۵	۳،۵۷۱،۳۱۶		۲،۲۶۰،۴۴۳
۱۳	۱۳	۱۵۱۶	۶،۷۲۹،۵۳۳	۹،۸۹۶،۳۷۲	۳۲	۶،۲۴۵،۰۰۷
۱۴	۱۱	۱۵۱۳	۴،۲۱۷،۰۳۶	۶،۲۰۱،۵۲۴		۳،۸۵۸،۵۸۸
۱۵	۲۴	۱۵۱۳	۱،۶۱۹،۵۰۲	۲،۳۸۱،۶۲۰		۱،۴۷۴،۰۷۰
۱۶	۹	۱۵۰۸	۴،۴۷۳،۲۴۹	۶،۵۷۸،۳۰۷		۴،۰۷۰،۶۵۶
۱۷	۱۴	۱۴۹۷	۵،۲۴۲،۶۸۸	۷،۷۰۹،۸۳۶		۴،۷۵۵،۱۱۸
۱۸	۱۵	۱۴۹۴	۵،۴۹۷،۴۴۱	۸،۰۸۴،۴۷۲		۴،۹۵۳،۱۹۴
۱۹	۲۵	۱۴۹۲	۱،۲۱۸،۸۸۴	۱،۷۹۲،۴۷۶		۱،۰۹۶،۹۹۵
۲۰	۱۷	۱۴۸۷	۶،۲۳۳،۶۰۸	۹،۱۶۷،۰۷۱		۵،۵۸۵،۳۱۳
۲۱	۲۱	۱۴۸۲	۳،۲۸۳،۷۸۱	۴،۸۲۹،۰۹۰		۲،۹۲۳،۵۵۰
۲۲	۱۸	۱۴۸۰	۶،۲۹۰،۷۴۳	۹،۲۵۱،۰۹۲		۵،۵۸۶،۱۷۹
۲۳	۲۶	۱۴۸۰	۱،۳۳۱،۵۴۱	۱،۹۵۸،۱۴۸		۱،۱۷۳،۰۸۷
۲۴	۲	۱۴۷۹	۴،۳۹۳،۳۰۷	۶،۴۶۰،۷۴۶		۳،۸۴۵،۰۲۳
۲۵	۲۳	۱۴۷۶	۳،۶۹۶،۳۱۸	۵،۴۳۵،۷۶۲		۳،۲۲۳،۱۸۹
۲۶	۱۹	۱۴۷۲	۵،۸۳۶،۷۴۷	۸،۵۸۳،۴۵۲		۵،۰۷۷،۹۷۰
مقدار تجمعی نیازها و آب تحویلی در کانال اصلی			۱۰۸،۲۹۲،۳۸۵	۱۵۹،۲۵۳،۵۰۸		۱۰۱،۱۸۹،۴۴۳

www.SID.ir

Archive of SID

اولویت‌های ارائه شده در جدول ۶ را به‌عنوان مبنای وزن‌دهی جریمه‌های جدید در روند بهینه‌سازی لحاظ کرده است. بر این اساس تنظیم سطح آب توسط سامانه کنترل خودکار مرکزی پیش بین، بر مبنای حداقل‌سازی خطای اندازه‌گیری شده رقوم سطح آب (تفاوت رقوم سطح آب اندازه‌گیری شده با رقوم هدف) در طول کانال اصلی آبیاری، در راستای تحقق اهداف اقتصادی صورت گرفته است. گفتنی است که در شرایط معمول بهره برداری توسط سامانه متداول بهره‌برداری (شرایط فقدان ساختار توسعه‌یافته بهره‌برداری–اقتصادی)، هیچ اولویتی بین واحدهای زراعی مختلف نیست. لذا کنترل‌گر به‌صورت تصادفی، حداقل سازی خطای رقوم سطح آب از هدف را انجام داده و هیچ نقشه راهبردی برای سامانه کنترل خودکار تعریف نشده است. با استفاده از پتانسیل‌های مدل اقتصادی، سازوکاری فراهم شده که به‌واسطه آن، پهنه‌بندی مکانی شبکه آبیاری بر اساس اهداف مدیریت بهینه از آب فراهم شده است. بنابراین مدل اقتصادی به‌عنوان مغز متفکر ساختار توسعه داده شده در این تحقیق، بخش نرم‌افزاری بهره‌برداری شبکه آبیاری را مدیریت می‌کند.

با استفاده از حجم آب به‌دست آمده از مدل بهره‌برداری، مطابق نتایج ارائه شده در جدول ۶، و لحاظ آن در مدل اقتصادی (به‌عنوان سناریوی کم‌آبی) تغییرات الگوی کشت موجود واحدهای زراعی ۲۶گانه شبکه آبیاری رودشت به‌شرح جدول ۷ ارائه شده است. مطابق نتایج به‌دست آمده در این جدول اعمال سناریوی کم‌آبی در ساختار توسعه‌یافته این تحقیق موجب تغییر الگوی کشت موجود شبکه آبیاری رودشت، توسط کشاورزان می‌شود. به‌عبارت دیگر، با کاهش حجم آب تحویلی در قالب سناریوی کم‌آبی، سطح زیر کشت محصولات زراعی با درصدهای متفاوتی کاهش یافته است. علت این کاهش را می‌توان در هدف کشاورزان (بیشینه کردن سود حاصل از فعالیت‌های زراعی) جستجو کرد. بر این اساس و با کاهش حجم آب تحویلی به واحدهای ۲۶گانه، به‌عنوان یکی از محدودیت‌های مدل اقتصادی سبب می‌شود که عملکرد محصولات و به‌تبع آن، بازده اقتصادی فعالیت‌های زراعی کاهش یابد، بنابراین کشاورزان به‌منظور واکنش به این تغییرات، الگوی کشتی را انتخاب می‌کنند که منافع اقتصادی بالایی در مقابل سایر محصولات داشته باشد. گفتنی است. بر همین اساس انتظار می‌رود این سیاست منجر به کاهش سطح زیر کشت محصولاتی شود که سود و ارزش اقتصادی آب مصرفی آن، بیشترین کاهش را داشته باشد (با فرض اینکه با اجرای این سیاست تغییرات در قیمت محصول و نهاده‌ها رخ ندهد).

با توجه به اطلاعات جدول ۷، یونجه و گلرنگ از جمله محصولاتی هستند که کشاورزان شبکه آبیاری در واکنش به سیاست مورد نظر، سطح زیر کشت آنها را در الگوی زراعی خود با شدت بیشتری در مقایسه با سایر محصولات (از جمله گندم) کاهش می‌دهند. علت این مهم به قیمت محصول، ارزش اقتصادی آب مصرفی، درآمد خالص و میزان مصرف آب محصولات گفته شده بستگی دارد. با علم به این موضوع و با توجه به نتایج مدل اقتصادی، یونجه و گلرنگ از جمله محصولاتی هستند که ارزش اقتصادی آب و سود ناخالص کمتری در واحد هکتار نسبت سایر محصولات زراعی، دارا است. همچنین مصرف آب آن در واحد هکتار نیز، نسبت به محصولات دیگر زیاد است. به‌طریق مشابه، علت نوسانات کمتر الگوی کشت گندم را می‌توان با وجود هزینه‌های بالا، در قیمت تضمینی آن در مقایسه با سایر محصولات زراعی توجیه کرد.

نتایج ارزیابی عملکرد سامانه بهره‌برداری توسعه داده شده در این تحقیق بر اساس شاخص ارزیابی عملکرد «کفایت تحویل آب» در جدول ۸ ارائه شده است. همان طور که در جدول نیز ارائه شده است، شاخص کفایت تحویل آب در دو حالت «مبتنی بر رویکرد بهره‌برداری» و «مبتنی بر رویکرد بهره‌برداری– اقتصادی» سنجیده شده است. مطابق شاخص کفایت تحویل آب، در بهره‌برداری معمول کانال (عدم بهره‌گیری از رویکرد اقتصادی) بیشترین مقادیر شاخص کفایت تحویل آب مربوط به چهار آبگیر واقع در بالادست کانال (آبگیر یک تا چهار) به‌دست آمده است. این درحالی است که با به‌کارگیری رویکرد بهره‌برداری– اقتصادی، آبگیرهای ۱، ۶، ۵ و

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۷. درصد تغییرات الگوی کشت موجود واحدهای ۲۶گانه با به‌کارگیری ساختار توسعه‌یافته بهره‌برداری- اقتصادی در تحویل و توزیع آب در کانال اصلی شبکه آبیاری رودشت

شماره واحد زراعی درجه دو	گندم		جو		یونجه		گلرنگ		چغندر قند	
	سطح زیر کشت فعلی (هکتار)	درصد تغییرات	سطح زیر کشت فعلی (هکتار)	درصد تغییرات	سطح زیر کشت فعلی (هکتار)	درصد تغییرات	سطح زیر کشت فعلی (هکتار)	درصد تغییرات	سطح زیر کشت فعلی (هکتار)	درصد تغییرات
۱	۱۴۳	- ۵	۲۷	- ۵						
۲	۳۹۹	- ۶	۷۶	- ۶	۴۲	- ۱۱	۳۱	- ۹		
۳	۴۶۶	- ۵	۸۹	- ۵	۴۹	- ۱۱	۳۶	- ۹		
۴	۹۲۱	- ۶	۱۷۶	- ۶	۹۷	- ۱۳	۷۱	- ۱۰	۲۲	-۵
۵	۲۳۵	- ۶	۴۵	- ۶						
۶	۲۹۶	- ۶	۵۶	- ۶			۲۳	-۱۱/۱		
۷	۳۳۰	- ۵	۶۳	- ۵	۳۵	- ۱۱				
۸	۳۵۴	- ۵	۶۷	- ۵	۳۷	- ۱۲				
۹	۴۰۷	- ۵	۷۷	- ۶	۴۳	- ۱۲	۳۱	-۱۰/۳۶		
۱۰	۴۲۷	- ۶	۸۱	- ۶	۰					
۱۱	۴۱۶	- ۷	۷۹	- ۷	۴۴	- ۱۵				
۱۲	۵۱۷	- ۷	۹۸	- ۸	۵۴	- ۱۸	۴۰	- ۱۵		
۱۳	۶۱۲	- ۶	۱۱۷	- ۶	۶۴	- ۱۳	۴۷	- ۱۱		
۱۴	۴۵۸	- ۶	۸۷	- ۶	۴۸	- ۱۴	۳۵	- ۱۱		
۱۵	۵۰۰	- ۸	۹۵	- ۸	۵۲	- ۱۹	۳۹	- ۱۵		
۱۶	۴۷۴	- ۵	۹۰	- ۵	۵۰	- ۱۰	۳۷	- ۱۰		
۱۷	۵۶۷	- ۶	۱۰۸	- ۶	۵۹	- ۱۴	۴۴	- ۱۲		
۱۸	۵۷۲	- ۶	۱۰۹	- ۶	۶۰	- ۱۵	۴۴	- ۱۲		
۱۹	۵۳۰	- ۹	۱۰۱	- ۹	۵۶	- ۲۱	۴۱	- ۱۷		
۲۰	۲۸۶	- ۷	۵۴	- ۷	۰					
۲۱	۳۲۴	- ۸	۶۲	- ۸	۳۴	-۱۹				
۲۲	۲۷۷	- ۷	۵۳	- ۸	۰					
۲۳	۳۶۵	- ۸	۷۰	- ۹	۳۸	-۲۲				
۲۴	۱۸۵	- ۶	۳۵	- ۶						
۲۵	۱۴۴	- ۸	۰				۱۱	-۱۷		
۲۶	۱۳۸	- ۷	۲۶	- ۷	۱۱	-۱۵				

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۸. مقادیر شاخص کفایت تحویل آب به واحدهای زراعی ۲۶گانه کانال اصلی رودشت در دو حالت معمول و اصلاح شده

شماره آبگیر	میانگین شاخص کفایت (بر اساس شاخص ارائه شده (۳))	میانگین شاخص کفایت (براساس شاخص اصلاح شده مبتنی بر رویکرد بهره‌برداری- اقتصادی)	شماره آبگیر	میانگین شاخص کفایت (بر اساس شاخص ارائه شده (۳))	میانگین شاخص کفایت (بر اساس شاخص اصلاح شده مبتنی بر رویکرد بهره‌برداری- اقتصادی)
۱	۱۰۰	۱۰۰	۱۴	۹۵/۲	۹۲
۲	۹۷	۱۰۰	۱۵	۸۵	۹۲
۳	۹۷/۵	۱۰۰	۱۶	۹۵/۵	۹۱
۴	۹۵	۹۹	۱۷	۹۴/۸	۹۰
۵	۹۵	۹۸	۱۸	۹۴/۵	۹۰
۶	۹۴/۴	۹۸	۱۹	۸۳	۹۰
۷	۹۸	۹۸	۲۰	۹۳	۸۹/۸
۸	۹۸	۹۷	۲۱	۸۹	۸۹/۷
۹	۹۷	۹۶	۲۲	۹۲	۸۹/۵
۱۰	۹۶	۹۵	۲۳	۸۵	۸۹
۱۱	۹۱	۹۴	۲۴	۱۰۰	۸۸
۱۲	۸۶	۹۳	۲۵	۸۷	۸۷
۱۳	۹۴/۸	۹۳	۲۶	۹۲	۸۷

۱۲ که مطابق نتایج مدل‌سازی اقتصادی بالاترین اولویت تحویل آب را به‌دست آورده‌اند، مطلوب‌ترین مقادیر شاخص کفایت را دارا هستند. بنابراین لازم است ارزیابی عملکرد ساختار توسعه داده شده بهره‌برداری- اقتصادی با استفاده از شاخص‌های اصلاح شده بهره‌برداری مورد ارزیابی قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

این تحقیق برای اولین بار اقدام به معرفی رویکرد بهره‌برداری- اقتصادی به‌عنوان راهبرد جدیدی در بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری پرداخته است. در ادامه ساختار معرفی شده برای مدیریت بهره‌برداری شبکه آبیاری رودشت مورد آزمون قرار گرفته و بهره‌برداری شبکه قبل و بعد از به‌کارگیری ساختار توسعه داده شده مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به آنکه ساختار توسعه داده شده امکان به‌کارگیری در تمامی شبکه‌های آبیاری که مکانیزم بازار آب در آنها شکل نگرفته است، لذا در این قسمت دستاوردهای به‌کارگیری از رویکرد توسعه داده شده بهره‌برداری- اقتصادی به‌طور خلاصه در قالب موارد ذیل ارائه شده است:

۱- امکان برآورد پتانسیل‌های واقعی اقتصادی موجود در منطقه با به‌کارگیری روش بهره‌برداری موجود در کانال‌های اصلی و فرعی، به‌منظور تعیین سطوح ارتقاء عملکرد در طرح‌های مدرن سازی، نوسازی و بهسازی شبکه آبیاری.

۲- بررسی و مقایسه میزان کارایی انواع روش‌های بهره‌برداری (اعم از روش‌های مرسوم و سنتی تا روش‌های اتوماسیون موضعی و سراسری) و نیز استراتژی‌های بهره‌برداری (شامل روش‌های تحویل و توزیع گردشی، توافقی و برحسب تقاضا) با هدف افزایش منافع اقتصادی حاصل از فعالیت‌های کشاورزی در شبکه آبیاری.

۳- امکان تغییر نگرش مدیریتی تصمیم‌گیران شبکه آبیاری از مفاهیم فقط فیزیکی بهره‌وری آب به بهره‌وری اقتصادی با

www.SID.ir

Archive of SID

استفاده از شاخص‌های جدید ارزیابی عملکرد بهره‌برداری شبکه آبیاری بر پایه مفهوم بهره‌برداری- اقتصادی (شاخص بازنگری شده کفایت تحویل آب).

۴- ارائه الگوی کشت بهینه موجود (تراکم کشت بهینه محصولات واقع در الگوی کشت موجود نواحی مختلف) شبکه آبیاری در قالب ساختار توسعه یافته و بررسی منافع و مضرات کلی و موردی حاصل تحت سناریوهای مختلف بهره‌برداری (اعم از پرآبی، نرمال و کم‌آبی).

۵ – توانایی تخصیص آب بر اساس ارزش اقتصادی آن توسط رویکرد توسعه داده شده در زمان‌ها و مکان‌های مختلف و بررسی تأثیرات بهره‌برداری با رویکرد اقتصادی برای تصمیم گیری در مورد پیاده‌سازی یا عدم پیاده‌سازی بازار محلی آب در شبکه آبیاری. به‌عبارت دیگر رویکرد ارائه شده در این پژوهش مدیران را قادر خواهد ساخت تا زیرساخت‌های فنی امکان‌پذیر برای راه‌اندازی بازار آب در شبکه آبیاری را مورد بررسی همه جانبه قرار دهند.

قدردانی

این تحقیق با حمایت مالی شرکت آب منطقه‌ای اصفهان در قالب پروژه تحقیقاتی شماره ۹۶/۱۲۸ صورت پذیرفته است. نویسندگان مقاله تشکر خود را از این شرکت اعلام می‌کنند.

منابع مورد استفاده

1- Beare S. C., R. Bell and B. S. Fisher. 1998. Determining the value of water: the role of risk, infrastructure constraints, and ownership. *American Journal of Agricultural Economics* 80(5): 916-940.
2- Car, N. J. 2018. USING decision models to enable better irrigation decision support systems. *Computers and Electronics in Agriculture* 152: 290-301.
3- El Baki, H. M. A., H. Fujimaki, I. Tokumoto and T. Saito. 2018. A new scheme to optimize irrigation depth using a numerical model of crop response to irrigation and quantitative weather forecasts. *Computers and Electronics in Agriculture* 150: 387-393.
4- García, I. F., P. Montesinos, E. C. Poyato and J. R. Díaz. 2017. Optimal design of pressurized irrigation networks to minimize the operational cost under different management scenarios. *Water Resources Management* 31: 1995-2010.
5- Gómez-Limón, J. A. and G. Sanchez-Fernandez. 2010. Empirical evaluation of agricultural sustainability using composite indicators. *Ecological Economics* 69(2): 1062-1075.
6- Hezareh, R., U. Hassani and S. Sahayn Mehr. 2017. The impact assessment of different agricultural sector policies on its productivity indicators in Qazvin plain. *Iran Water Research Journal* 10(1): 73-83. (In Farsi).
7- Howitt, R. E., J. Medellín-Azuara, D. MacEwan and J. R. Lund. 2012. Calibrating disaggregate economic models of agricultural production and water management. *Environmental Modelling & Software* 38(4): 244-258.
8- Inas, E. -G., N. Grigg and R. Waskom. 2017. Water-food-energy: nexus and non-nexus approaches for optimal cropping pattern. *Water Resources Management* 1-10.
9- Medellín-Azuara, J., J. J. Harou and R. E. Howitt. 2010. Estimating economic value of agricultural water under changing conditions and the effects of spatial aggregation. *Science of the Total Environment* 408(23): 5639-5648.
10- Ministry of Energy. 2015. Report of National Synthesis of Master Water Plan. (In Farsi)
11- Molden, D. J. and T. K. Gates. 1990. Performance measures for evaluation of irrigation-water-delivery systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 136(11):747-756
12- Noel, J. E. and R. E. Howitt. 1982. Conjunctive multibasin management: An optimal control approach. *Water Resources Research* 18(4): 753-763.
13- Oñate, J. J., I. Atance, I. Bardají and D. Llusia. 2007. Modelling the effects of alternative CAP policies for the Spanish high-nature value cereal-steppe farming systems. *Agricultural Systems* 94(2): 247-260.
14- Peralta, R. C., M. A. Hegazy and G. R. Musharrafieh. 1994. Preventing pesticide contamination of groundwater while maximizing irrigated crop yield. *Water Resources Research* 30(11): 3183-3193.
15- Playán, E. and L. Mateos. 2006. Modernization and optimization of irrigation systems to increase water productivity. *Agricultural Water Management* 80(3): 100-116.
16- Rogers, P., C. Hurst and N. Harshadeep. 1993. Water resources planning in a strategic context: Linking the water

www.SID.ir

sector to the national economy. *Water Resources Research* 29(7): 1895-1906.
17- Sawant, S., S. S. Durbha and A. Jagarlapudi. 2017. Interoperable agro-meteorological observation and analysis platform for precision agriculture: A case study in citrus crop water requirement estimation. *Computers and Electronics in Agriculture* 138: 175-187.
18- Shahdany, S. H., E. A. Majd, A. Firoozfar and J. Maestre. 2016. Improving operation of a main irrigation canal suffering from inflow fluctuation within a centralized model predictive control system: case study of Roodasht Canal, Iran. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 142: 4050-4061.
19- Smith, M. D., M. P. Rabbitt and A. Coleman-Jensen. 2017. Who are the world's food insecure? New evidence from the Food and Agriculture Organization's Food Insecurity Experience Scale. *World Development* 93: 402-412.
20- Taghvaeian, S. and C. M. Neale. 2011. Water balance of irrigated areas: a remote sensing approach. *Hydrological Processes* 25: 4132-4141.
21- Van overloop, P. J. 2006. Model Predictive Control on Open Water Systems, IOS Press, Delft.
22- Van overloop, P. J., A. J. Clemmens, R. J. Strand, R. M. J. Wagemaker and E. Bautista. 2010. Real-time implementation of model predictive control on Maricopa-Stanfield irrigation and drainage district's WM canal. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 136(11): 747-756.
23- Varela-Ortega, C., I. Blanco-Gutiérrez, C. H. Swartz and T. E. Downing. 2011. Balancing groundwater conservation and rural livelihoods under water and climate uncertainties: An integrated hydro-economic modeling framework. *Global Environmental Change* 21(2): 604-619.

www.SID.ir

Archive of SID

Journal of Water and Soil Science
Vol. 24, No. 1, Spring 2020, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Developing A New Operation-Economic Framework for Irrigation Networks without Water Market

Y. Hassani[1], S. M. Hashemy Shahdany[2*] and B. Zahraei[3]

(Received: February 12-2019; Accepted: June 19-2019)

Abstract

This study focused on proposing a new operational perspective within main and lateral irrigation canals based on the economic value of water. To achieve this objective, the operation-economic framework offered in this study consisted of two main components of the PMP model and Operation model. The estimated economic values of water in different regions of the network were employed as the starting point for connecting the economic model with the operation model. It is worth mentioning that the technical perspective targeting adequacy of water distribution within the canals was modified in this study to be applied for the operation-economic framework since the original forms of the indicator were based on physical inherent of the water. Roodasht Irrigation District, located at Zayandeh-Rud basin, was selected as the case study, and the proposed framework was tested on the district. The obtained results revealed that in response to implementing the proposed framework in water distribution within the canal under the water shortage condition, alfalfa and safflower were the two crops those cultivation was decreased drastically in comparison with the other crops. The primary reason for the decrease was the lower values of the economic value of water for these two crops. Also ,the results of the canal operation appraisal from the adequacy of water delivery revealed that for the traditional operating system (without considering the economic perspective), the maximum values of the adequacy indicator were obtained for the upstream four canal reaches. On the other hand, the off-takes numbers of 1, 6, 5, and 12 got the maximum values of the adequacy indicator when the proposed operation-economic framework was applied for the canal system.

Keywords: Economic value of water; Irrigation District; Economic simulation, Operational management.

1. Office of Water Consumption Management and Improving Water Productivity, Ministry of Energy, Tehran, Iran.
2. Irrigation Engineering Department, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran.
3. School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
*: Corresponding author, Email: mehdi.hashemy@ut.ac.ir

www.SID.ir